# บทที่ 5

## การแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องโดยใช้ลีเนียร์โปรแกรมมิง

เนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าต่างมีข้อจำกัดในการทำงาน เช่น สายส่งสามารถรับกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกินค่าที่กำหนด หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำเป็นต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าไม่ต่ำกว่าค่าต่ำสุดค่าหนึ่งและไม่เกินค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ค่ากำหนดต่าง ๆ เหล่านี้ถือเป็นเงื่อนไขบังคับของระบบ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของอุปกรณ์ในระบบ ดังนั้นในการเกิดเหตุขัดข้องบางครั้งเราจำเป็นต้องทำการแก้ไข(Remedial action) หากสถานะของระบบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะอาศัยการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ (Generation reschedule) และ/หรือ การตัดโหลด(Load curtailment) โดยใช้หลักการซึ่งสอดคล้องกับการปฏิบัติจริงในทางปฏิบัติของการไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องโดยใช้ลีเนียร์โปรแกรมมิง (Linear programming) โดยในหัวข้อ 5.1 จะกล่าวถึง ขั้นตอนการสร้างเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง กับ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าบัส และหัวข้อ 5.2 จะกล่าวถึงการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องโดยใช้ลีเนียร์โปรแกรมมิง

### 5.1 ขั้นตอนการสร้างเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง กับ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าบัส

การนำลีเนียร์โปรแกรมมิงมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องในระบบจำเป็นต้องสร้างเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่ง กับ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าบัสเสียก่อนโดยมีขั้นตอนดังนี้[10]

เนื่องจาก กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเส้นที่ i ($T_i$) สายส่งมีค่ารีแอคแทนซ์เท่ากับ $x_{km}$ ในระบบที่มี n บัสโดยต่ออยู่ระหว่างบัสที่ k กับบัสที่ m ในกรณีที่ใช้ดีซีโหลดโฟลว์ในการวิเคราะห์สามารถหาได้โดยใช้สมการ 5.1

$$T_i = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \qquad (5.1)$$

และโดยการนิยามให้

$$[e_i]^T = [0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad \underset{k}{+1} \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad \underset{m}{-1} \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad 0] \tag{5.2}$$

และ

$$[\theta] = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_n]^T \tag{5.3}$$

จะสามารถจัดสมการ 5.1 ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการ 5.4

$$T_i = \frac{[e_i]^T[\theta]}{x_{km}} \tag{5.4}$$

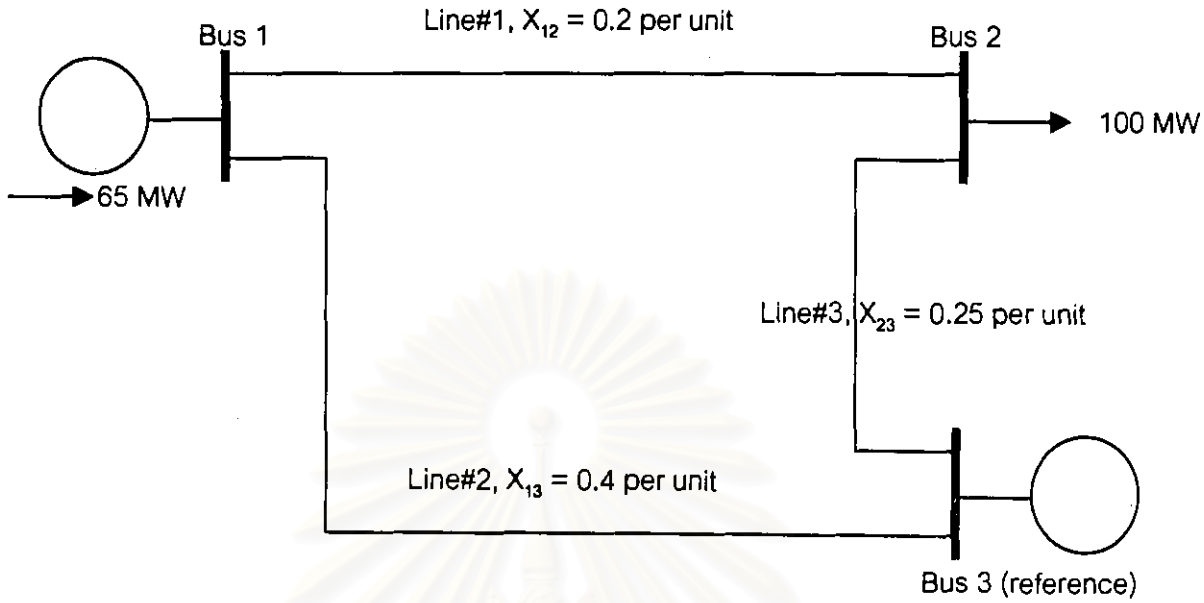
แทนค่า $[\theta] = [B']^{-1}[P]$ จากสมการ 4.18 ลงในสมการ 5.4 จะได้

$$T_i = \frac{[e_i]^T[B']^{-1}}{x_{km}}[P] = [A_i][P] \tag{5.5}$$

เพราะฉะนั้นจะได้เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเส้นที่ i กับ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าบัส($A_i$) ดังสมการ 5.6

$$[A_i] = \frac{[e_i]^T[B']^{-1}}{x_{km}} \tag{5.6}$$

สำหรับตัวอย่างการสร้างเมตริกซ์ A สำหรับระบบ 3 บัส ดังแสดงในรูปที่ 5.1 สามารถทำได้ดังนี้[11]




รูปที่ 5.1 ระบบตัวอย่างขนาด 3 บัส

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของระบบจะสามารถเขียนเมตริกซ์ B' ตามหลักการที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 ได้ดังสมการที่ 5.7

$$B' = \begin{bmatrix} 7.5 & -5.0 \\ -5.0 & 9.0 \end{bmatrix} \qquad (5.7)$$

ส่วนสมาชิกแถวที่ 1 2 และ 3 ของเมตริกซ์ A ได้แก่ $A_1$, $A_2$ และ $A_3$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5.8 ถึง 5.10

$$A_1 = \frac{[1 \quad -1]\begin{bmatrix} 7.5 & -5.0 \\ -5.0 & 9.0 \end{bmatrix}^{-1}}{0.2}$$

$$= [0.4706 \quad -0.2941] \qquad (5.8)$$

$$A_2 = \frac{[1 \quad 0]\begin{bmatrix} 7.5 & -5.0 \\ -5.0 & 9.0 \end{bmatrix}^{-1}}{0.4}$$

$$= [0.5294 \quad 0.2941] \tag{5.9}$$

$$A_3 = \frac{[0 \quad 1]\begin{bmatrix} 7.5 & -5.0 \\ -5.0 & 9.0 \end{bmatrix}^{-1}}{0.25}$$

$$= [0.4706 \quad 0.7059] \tag{5.10}$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนเมตริกซ์ A ได้ดังสมการ 5.11

$$A = \begin{bmatrix} 0.4706 & -0.2941 \\ 0.5294 & 0.2941 \\ 0.4706 & 0.7059 \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

และในกรณีนี้จะสามารถคำนวณกำลังจริงที่ไหลผ่านสายส่งทั้งสามเส้นโดยอาศัยสมการที่ 5.5 ได้ดังนี้

$$T_i = [A_i][P]$$

$$= \begin{bmatrix} 0.4706 & -0.2941 \\ 0.5294 & 0.2941 \\ 0.4706 & 0.7059 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.65 \\ -1.00 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.60 \\ 0.05 \\ -0.40 \end{bmatrix} \quad per\ unit \tag{5.12}$$

## 5.2 การแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องโดยใช้ลีเนียร์โปรแกรมมิง

โปรแกรมสำหรับประเมินความเชื่อถือได้ในระดับชั้นที่ 2 นั้น ล้วนมีความแตกต่างในรายละเอียด เช่น วิธีการในการเลือกสถานะของระบบเพื่อนำมาพิจารณา แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการประเมินความพอเพียงและการแก้ไขระบบเมื่อสถานะของระบบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ ตลอดจนหลักการแก้ไขปัญหาเมื่อมีปัญหาเกิดขึ้นในระบบ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะยึดหลักการทั้งสามข้อดังต่อไปนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีในทางปฏิบัติจริงของการไฟฟ้าให้มากที่สุดคือ [13]

1) พยามยามหลีกเลี่ยงการตัดโหลด หรือหากไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้จึงตัดโหลดให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

2) เลือกตัดโหลดที่มีความสำคัญน้อยที่สุดก่อน แล้วจึงตัดโหลดที่มีความสำคัญมากขึ้นตามลำดับ

3) เลือกตัดโหลดที่ใกล้จุดที่เกิดความผิดพร่องมากที่สุดก่อน แล้วจึงตัดโหลดที่อยู่ห่างจากจุดที่เกิดความผิดพร่องมากขึ้นตามลำดับ

วิธีการทั่ว ๆ ไปที่ใช้กันอยู่จะทำการพิจาณาตามหลักการทั้งสามข้อข้างต้นผสมผสานกับประสบการณ์ แล้วจึงทำการตัดโหลดตามหลักการดังนี้[5,3]

กรณีที่เกิดการขัดข้องในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะตัดโหลด ณ บัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ถ้าไม่เพียงพอจึงทำการตัดโหลด ณ บัสถัดไปที่เชื่อมต่ออยู่ภายในหนึ่งระยะสายส่งจากบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ซึ่งโหลดบัสดังกล่าวรับกำลังไฟฟ้าจากบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดการขัดข้อง หากยังไม่พออีกให้ตัดโหลดที่บัสที่เหลือเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดที่จะต้องทำการตัดเพิ่มเติม

กรณีเกิดการขัดข้องในสายส่งกำลังไฟฟ้า จะตัดโหลด ณ บัสที่เชื่อมต่อด้านปลายของสายส่งที่เกิดการขัดข้อง (Receiving end buses) ถ้าไม่เพียงพอก็ตัดโหลด ณ บัสถัดไปที่เชื่อมด้วยหนึ่งระยะสายส่ง ซึ่งรับกำลังไฟฟ้าจากบัสที่เชื่อมต่อด้านปลายของสายส่งที่เกิดการขัดข้อง และหากยังไม่เพียงพออีกก็ให้ตัดโหลดที่บัสถัดไปที่เชื่อมด้วย 2 ระยะสายส่ง ซึ่งรับกำลังไฟฟ้าจากบัสที่เชื่อมต่อด้านปลายของสายส่งที่เกิดการขัดข้อง

กรณีเกิดการขัดข้องทั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งกำลังไฟฟ้า วิธีการตัดโหลดจะครอบคลุมทั้งสองกรณีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

วิธีการการพิจาณาตามหลักการผสมผสานกับประสบการณ์ดังที่กล่าวไปแล้วนั้นยังมีข้อเสียคือคำตอบที่ได้อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด เช่น กรณีที่จำเป็นต้องตัดโหลดนั้นคำตอบที่ได้จากวิธีพิจารณาอาจทำให้ต้องตัดโหลดมากเกินความจำเป็น หรือบางกรณีที่ปัญหาสามารถแก้ไขได้ด้วยการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่แต่หากใช้วิธีพิจารณาอาจจำเป็นต้องตัดโหลดทั้ง ๆ ที่สามารถหลีกเลี่ยงได้

ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับหลักการในทางปฏิบัติในข้อ 1) 2) และ 3) และเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด วิทยานิพนธ์นี้จึงนำวิธีลีเนียร์โปรแกรมมิง มาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาได้โดยทำการหาค่าต่ำสุดของสมการที่ 5.13 ซึ่งแสดงผลรวมของโหลดทุกชนิดที่ทุกบัสที่มีโหลด ซึ่งจำเป็นต้องถูกตัดออกจากระบบ เพื่อให้ระบบยังคงจ่ายโหลดที่เหลืออยู่ได้โดยไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับ และเนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ดีซีโหลดโฟลว์ในการวิเคราะห์ ดังนั้นเงื่อนไขบังคับทางด้านแรงดันของระบบจึงไม่นำมาพิจารณา จึงพิจารณาเฉพาะขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งแต่ละเส้นในระบบเท่านั้น

เมื่อพิจารณาสมการ 5.13 จะพบว่าค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้คือศูนย์ ในกรณีที่ได้คำตอบเท่ากับศูนย์หมายความว่าการปรับเปลี่ยนกำลังผลิตที่บัสต่าง ๆ ในระบบสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการตัดโหลดซึ่งสอดคล้องกับหลักการในข้อ 1)

$$z = \sum_{i \in NC} \left( W_i \sum_{j=1}^{m} \beta_j C_{ij} \right) \qquad (5.13)$$

*subject to*

$$T_i = \sum_{k=1}^{n} A_{ik} \left( PG_k + \sum_{j=1}^{m} C_{kj} - PD_k \right) \quad ,(i = 1,\ldots,L)$$

$$\sum_{i \in NG} PG_i + \sum_{i \in NC} \left( \sum_{j=1}^{m} C_{ij} \right) = \sum_{i \in NC} PD_i$$

$$PG_i^{\min} \le PG_i \le PG_i^{\max} \quad ,(i \in NG)$$

$$0 \le C_{ij} \le \alpha_j PD_i \quad ,(i \in NC,\ j = 1,\ldots,m)$$

$$|T_i| \le T_i^{\max} \quad ,(i = 1,\ldots,L)$$

โดย $L$ = จำนวนสายส่งทั้งหมดในระบบ

$n$ = จำนวนบัสทั้งหมดในระบบ

$m$ = จำนวนประเภทของโหลดที่แบ่งในแต่ละบัส

$NC$ = เซตของบัสที่มีโหลด

$NG$ = เซตของบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$W_i$ = ค่าคงที่(มากกว่าศูนย์)ซึ่งค่ามากหรือน้อยนั้นสัมพันธ์กับระยะจากจุดที่เกิดความล้มเหลวเทียบกับตำแหน่งโหลดที่สนใจ

$\beta_j$ = ค่าคงที่(มากกว่าศูนย์)ซึ่งค่ามากหรือน้อยนั้นสัมพันธ์กับความสำคัญของโหลดที่สนใจตามที่ผู้ใช้กำหนด

$\alpha_j$ = ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับสัดส่วนของโหลดแต่ละประเภท

$C_{ij}$ = ปริมาณโหลดชนิดที่ j ซึ่งถูกระงับการจ่ายไฟฟ้าจากบัสที่ i

$T_i$ = กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเส้นที่ i

$A_{ik}$ = สมาชิกของเมตริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านสายส่งเส้นที่ i กับ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าบัสที่ k (ดูหัวข้อ 5.2)

$PG_i$ = กำลังการผลิตที่บัสที่ i

$PD_i$ = ปริมาณโหลดที่บัสที่ i

$PG_i^{max}$ = กำลังการผลิตสูงสุดที่บัสที่ i

$PG_i^{min}$ = กำลังการผลิตต่ำสุดที่บัสที่ i

ในวิทยานิพนธ์นี้จะจัดแบ่งความสำคัญของโหลดออกเป็น 3 ระดับเพื่อให้สอดคล้องกับหลักการในข้อ 2) ได้แก่

ก) โหลดที่สามารถตัดได้ (Interruptible/Curtailable Load) หมายถึงโหลดที่ไม่มีความสำคัญ สามารถตัดได้ทันทีเมื่อระบบเกิดปัญหาโดยที่ผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ได้เกิดความเสียหายมากนัก ดังนั้นเมื่อจำเป็นต้องมีการตัดโหลดจะพิจารณาตัดโหลดประเภทนี้เป็นลำดับแรก

ข) โหลดหลัก (Firm Load) หมายถึงโหลดที่มีความสำคัญมากกว่าโหลดที่สามารถตัดได้ การตัดโหลดประเภทนี้จะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ในระดับปานกลาง

ค) โหลดวิกฤติ (Critical Load) หมายถึงโหลดที่มีความสำคัญสูงสุด การตัดโหลดประเภทนี้จะส่งผลการทบต่อผู้ใช้มากที่สุด ดังนั้นเมื่อจำเป็นต้องมีการตัดโหลดจะพิจารณาตัดโหลดประเภทนี้เป็นลำดับสุดท้าย

และเพื่อให้สอดคล้องกับหลักการในข้อ 3) จะต้องทำการกำหนดค่าคงที่ $W_i$ ในสมการ 5.13 ให้สอดคล้องกับระยะจากจุดที่เกิดความล้มเหลวกับตำแหน่งโหลดที่สนใจ

สำหรับวิธีการกำหนดค่าของค่าคงที่ $W_i$ และ $\beta_j$ นั้นไม่สามารถกำหนดได้อย่างเจาะจง จำเป็นต้องลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมมิฉะนั้นผลการหาค่าต่ำสุดจากสมการ 5.13 จะผิดพลาด หรือค่าต่ำสุดที่ได้อาจจะไม่ผิดพลาดแต่ตำแหน่งของโหลดที่ควรจะตัดจะไม่เป็นอย่างที่ควรจะเป็น ซึ่งตัวอย่างของกรณีดังกล่าวจะพบได้ง่ายเมื่อทดสอบด้วยระบบ Modified IEEE Reliability Test System[10] ในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งความใกล้ไกลระหว่างจุดที่เกิดความล้มเหลวกับโหลดที่อาจจะต้องตัดเป็น 3 ระดับคือ

ระดับที่ 1 คือจุดโหลดที่อยู่บัสเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ล้มเหลวหรือ จุดโหลดที่บัสใดบัสหนึ่งซึ่งติดกับสายส่งที่ล้มเหลว ดังนั้นเมื่อจำเป็นต้องมีการตัดโหลดจะพิจารณาตัดโหลดประเภทนี้เป็นลำดับแรก

ระดับที่ 2 คือจุดโหลดที่อยู่ที่บัสข้างเคียงกับบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าล้มเหลว หรือจุดโหลดที่อยู่ข้างเคียงกับบัสใดบัสหนึ่งซึ่งติดกับสายส่งที่ล้มเหลว

ระดับที่ 3 คือจุดโหลดที่บัสที่เหลือทั้งหมดในระบบซึ่งไม่จัดอยู่ในระดับที่ 1 และ ไม่จัดอยู่ในระดับที่ 2 ดังนั้นเมื่อจำเป็นต้องมีการตัดโหลดจะพิจารณาตัดโหลดประเภทนี้เป็นลำดับสุดท้าย

ค่าคงที่ $W_i$ และ $\beta_j$ ที่ได้ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่

$$W_{\text{ระดับที่ 1}} = 1.0001$$

$$W_{\text{ระดับที่ 2}} = 1.0002$$

$$W_{\text{ระดับที่ 3}} = 1.0003$$

$\beta_{\text{โหลดที่ตามารถตัดได้}}$ = 1.0001

$\beta_{\text{โหลดหลัก}}$ = 1.0002

$\beta_{\text{โหลดวิกฤต}}$ = 1.0003

## 5.3 การแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องโดยใช้ลีเนียร์โปรแกรมมิงเมื่อระบบแยกตัว

ในกรณีที่ระบบแยกตัวออกจากกัน(Islanding)นั้นจะทำการแก้ปัญหาในลักษณะเดิมทุกประการเพียงแต่พิจารณาทีละส่วนของระบบที่แยกตัวออกจากกันเท่านั้น และอาจมีเงื่อนไขพิเศษอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเช่น หากกำลังการผลิตที่เหลืออยู่ในส่วนของระบบที่แยกตัวออกไปนั้นน้อยกว่าหรือมากกว่าโหลดที่มีอยู่ในส่วนนั้นมากมากจำเป็นต้องตัดโหลดทั้งหมดในส่วนนั้น เนื่องจากกรณีดังกล่าวจะทำให้ความถี่ของระบบเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เป็นต้น

สำหรับการแก้ไขปัญหาลีเนียร์โปรแกรมมิงนั้น เนื่องจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์นี้พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 5.1 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงอาศัยฟังก์ชันที่ MATLAB มีอยู่แล้วได้แก่ฟังก์ชัน 'LP' มาใช้ในการแก้ปัญหา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย